第37卷 第6期
2020年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 37 No. 6
Nov. 2020

肥料酸化对灌漠土pH的影响

陈 震[1,2]， 车宗贤[1,2]， 张久东[1]， 崔云玲[1]， 张立勤[1]

（1. 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所，甘肃 兰州 730070；
2. 甘肃农业大学资源与环境学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要：明确水肥一体化条件下不同酸度水肥溶液对灌漠土pH的改良效果，为碱性土壤合理施肥提供参考。本试验设置5个灌溉溶液pH：A1(1.5)、A2(3.5)、A3(5.5)、A4(7.5)（对照）和A5(9.5)，两个灌水量W1(1500 $m^3 \cdot hm^{-2}$)和W2(3000 $m^3 \cdot hm^{-2}$)，两个施氮量N1(450 $kg \cdot hm^{-2}$)和N2(900 $kg \cdot hm^{-2}$)，共20个处理，通过盆栽试验进行研究。结果表明：（1）土壤pH与灌溉溶液pH显著正相关，A1处理下0~5 cm土层土壤pH可降至7.16~7.4，相比A2、A3、A4、A5四个处理降低了0.45~0.81，与各处理间差异显著。（2）增加灌水量或施氮量对土壤pH无显著影响。（3）土壤pH在灌溉溶液的当天最低，然后慢慢恢复，且随着灌溉次数的增加，土壤pH越来越低。（4）各处理下土壤pH随土层深度的增加而增加，其中A1处理下0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm土层土壤pH分别为7.27、7.67、7.84、7.98、8.08，土层间差异最大。酸性溶液能显著降低灌漠土pH，不论是灌溉溶液pH，还是灌水量，或是施氮量，主要是改变了耕层土壤的pH，对底层土壤pH影响不大。所以，在农业生产中，可通过调节溶液酸度，降低碱性土壤pH，为作物的健康生长提供保障。

关键词：酸性肥料；土壤pH；灌漠土；黑麦草；水肥一体化

作为一个巨大的缓冲体系，土壤对酸、碱具有较强的缓冲性能。在我国，土壤呈现出南酸北碱的趋势，虽然近年来土壤酸化问题比较严重，但在北方，土壤pH仍处于一个比较高的水平，有些地区能达到9以上。作物的生长需要一个适宜的pH范围，土壤pH过高或过低都会对作物造成一定影响。大多数作物最适宜的pH范围为6.5 ~ 7.5，碱性土壤严重降低土壤养分的有效性，制约着农业的绿色发展。

土壤中pH深度对于植物的重要性不言而喻，对大多数作物来说，降低碱土pH，提供一个适宜的pH环境可以促进其健康生长。李燕婷等[1]研究了酸性根际肥与石灰性土壤pH之间的关系，结果表明，这种新型肥料可显著降低肥料颗粒2 cm范围内的土壤pH，提高了该区域土壤中有效铁的含量。张莉等[2]研究发现，磷酸脲能有效减轻菠菜的碱胁迫程度，并作为碱土的改良剂促进植物健康生长。田吉林等[3]发现，通过灌溉酸化水，土壤pH会显著降低，从而改善烤烟品质。一些有机物料对土壤pH有很好的改良效果，郭军玲等[4]在大同盆地苏打盐化土上的研究表明，风化煤和牛粪处理下的土壤pH降幅最大，改良效果较好。唐继伟等[5]研究发现，化肥配施有机肥，可维持盐化潮土pH的稳定性。此外，秸秆及其制成的生物炭也能有效地改良土壤pH[6-9]。大量研究表明，酸性物质可降低碱土的pH，在此背景下，本试验通过对肥料进行不同程度地酸化，配合水肥一体化技术，研究肥料pH及用量与土壤pH之间的关系，以期为碱土改良提供参考，并为后期新型肥料的研发提供理论支持。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验采用模拟试验和盆栽试验两种方式。模拟试验设在甘肃省农业科学研究院实验室内，盆栽试验设在甘肃省农业科学研究院武威绿洲试验站的温室中，供试土壤取自试验站的大田，肥力较低，过3 mm筛后风干、混匀，保存备用，其部分理化性状

收稿日期：2020-01-03； **修订日期：**2020-03-31
基金项目：国家重点研发计划(2018YFC1903700)；国家绿肥产业体系项目(CARS-22)；国家自然科学基金项目(31760140)；甘肃省农业科学院创新专项(2017GAAS26)资助
作者简介：陈震(1993-)，男，硕士研究生，研究方向为土壤肥力. E-mail: C_Zhen163@163.com
通讯作者：车宗贤. E-mail: chezongxian@163.com

分别为pH值8.33、有机质1.08%、全氮0.77 g·kg^{-1}、全磷0.56 g·kg^{-1}、碱解氮39.8 mg·kg^{-1}、速效磷3.1 mg·kg^{-1}、速效钾85.22 mg·kg^{-1}。供试作物为黑麦草(*Lolium perenne* Linn.)。供试氮肥为昆仑牌尿素，含氮量≥46.4%。

1.2 试验设计

1.2.1 模拟试验 单因素试验，设6个灌溉液pH，S1=1、S2=3、S3=5、S4=7、S5=7.8(CK)、S6=9，其中7.8为实验室所用自来水的pH，重复3次。准备18个无盖塑料盒，每个盒中装入500 g土壤。用98% H_2SO_4和NaOH配制成6种不同pH的溶液，每3 d往盒中加一次配制好的溶液，用量为盒中剩余干土重的20%。从第一次浇灌溶液开始每天测定土壤的pH并记录数据，试验持续45 d。

1.2.2 盆栽试验 多因素试验，设两个施氮量：低氮N1(450 kg·hm^{-2})和高氮N2(900 kg·hm^{-2})；两个灌水量低水W1(1500 m^3·hm^{-2})和高水W2(3000 m^3·hm^{-2})；根据模拟试验的结果在盆栽试验中设5个灌溉溶液pH，A1(1.5)、A2(3.5)、A3(5.5)、A4(7.5)(对照)、和A5(9.5)，其中7.5是当地灌溉水的平均pH。共20个处理，重复4次。由于直接用浓H_2SO_4酸化尿素不好计量，也比较危险，所以，采用不同pH的H_2SO_4溶液来达到酸化尿素的目的。

准备80个直径30 cm、高53 cm的PVC管做试验盆，在里面装入42 kg处理好的土壤，土壤表层距管口约是10 cm(图1)。在试验盆侧面开五个小孔，使其分别对应0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm的土层。再准备80个直径为20 cm、高为10 cm的小PVC管，将小PVC管底部埋入土中，埋深为2 cm，这部分为氨挥发收集装置[10]。在周围呈锯齿状种13窝黑麦草，窝距约为3 cm。经称量，

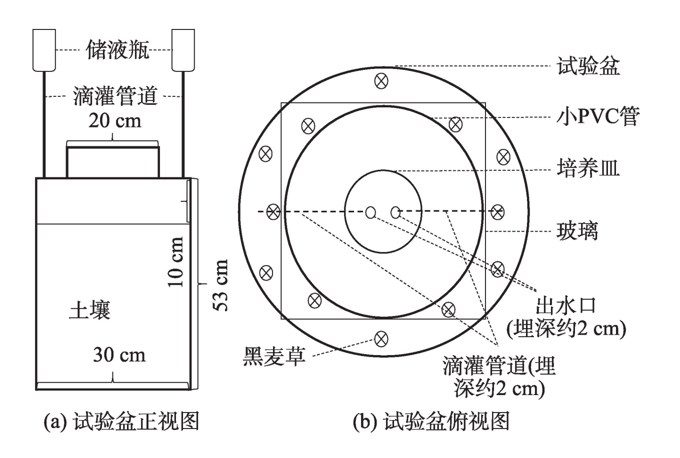


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Experimental device

上面20 cm的土层重为18.83 kg，在每个盆中加入3.77 kg(耕层土重的20%)的水供出苗用。待出苗后，开始灌水施肥。

将自来水用98% H_2SO_4和NaOH配制成1.5、3.5、5.5、7.5、9.5五种不同pH的溶液，按比例把尿素溶入5种pH溶液中，然后通过储液瓶和滴灌管道将溶液滴入相应的试验盆中。所有水肥分10次平均滴溉入土壤中，每周滴溉一次，每次滴灌所用98% H_2SO_4和NaOH的量见表1，由于酸碱的用量与施氮量无关，故不列出。

表1 滴灌H_2SO_4和NaOH用量

Tab. 1 The dosages of H_2SO_4 or NaOH per drip irrigation

灌水量处理	98% H_2SO_4/(L·hm^{-2})			NaOH/(kg·hm^{-2})	
	A1	A2	A3	A4	A5
W1	128.90	1.29	1.29×10^{-2}	1.90×10^{-3}	0.19
W2	257.79	2.58	2.58×10^{-2}	3.80×10^{-3}	0.38

1.3 测定方法

模拟试验中的所有土壤pH和盆栽试验的最终结果均采用玻璃电极法(NY/T 112.1−2006)测定，所用仪器为雷磁PHSJ-4F型实验室pH计，水土比为2.5:1。

盆栽试验期间，在第6次灌溉溶液后采用美国Spectrum pH600便携式土壤原位酸度计每天测定相应土层的土壤pH，连续测定8次。

2 结果与分析

2.1 模拟试验期间土壤pH动态变化

随着灌溉溶液的加入，各处理下的土壤pH处于不断地变化状态(图2)，灌溉溶液加入当天的土壤pH小于前一天。随着灌溉次数的增加，S1~S6的土壤pH呈现出一个逐渐降低的趋势，但S2和S5处理中的土壤pH在试验后期有一个先上升后下降的过程，具体原因有待考证。S1和S6的土壤pH在试验前期波动较大，而中后期的变化比较平稳，与S1、S6不同，S2、S3、S4、S5的土壤pH一直处于相对波动较大的变化趋势。主要由于碱溶液或过酸溶液带入的氢氧根离子或氢离子较多，一直与土壤中的相关离子发生中和反应，从而使得土壤pH处于一个相对稳定的状态。而近中性溶液或酸性稍弱的溶液在灌溉当天就中和完毕，然后土壤pH又开始慢慢恢复。

2.2 盆栽试验期间土壤pH动态变化

随着灌溉不同pH的溶液，土壤pH呈现不同的趋势。表2比较了第6次和第7次灌溉溶液当天的

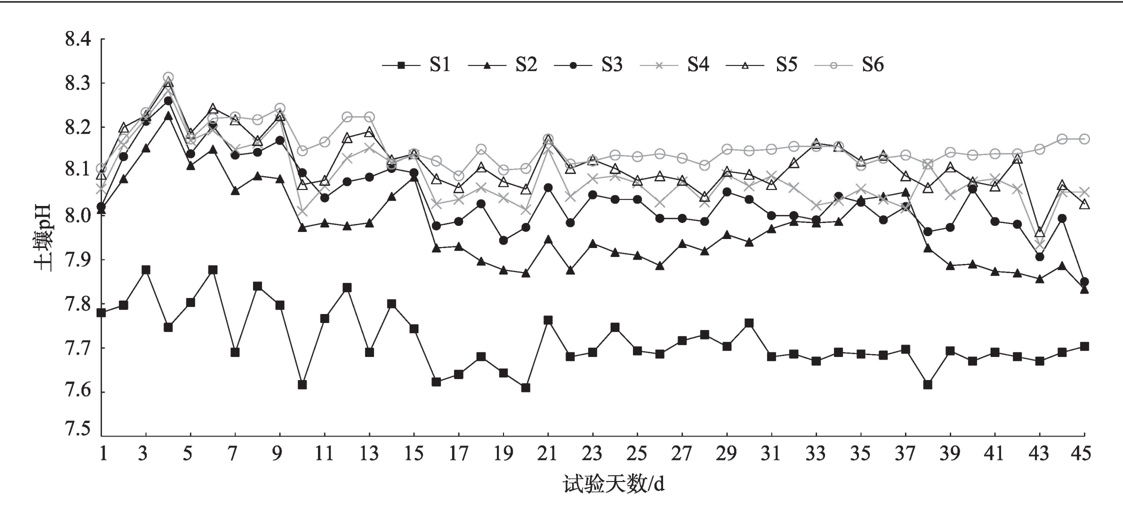


图2 模拟试验土壤pH动态变化

Fig. 2 Dynamic change of soil pH during the simulation experiment

表2 第6次与第7次灌溉溶液当天土壤pH的比较

Tab. 2 Comparison of soil pH on the day of the sixth and seventh irrigation solutions

溶液pH	土层/cm	灌水量/施氮量处理											
		W1N1			W2N1			W1N2			W2N2		
		第6次	第7次	增减率%	第6次	第7次	增减率%	第6次	第7次	增减率%	第6次	第7次	增减率%
A1	0~5	7.12	7.03	−1.26*	6.95	6.73	−3.17**	7.05	6.93	−1.70*	6.88	6.58	−4.36**
	5~10	7.39	7.21	−2.44**	7.12	7.06	−0.84	7.32	7.26	−0.82	7.05	6.84	−2.98**
	10~20	7.58	7.28	−3.96**	7.08	7.19	1.55*	7.50	7.21	−3.87**	7.01	6.91	−1.43*
	20~30	7.59	7.25	−4.48**	7.12	7.24	1.69*	7.51	7.19	−4.26**	7.05	6.93	−1.70*
	30~40	7.51	7.12	−5.19**	7.14	7.23	1.26*	7.44	7.09	−4.70**	7.07	6.99	−1.13*
A2	0~5	7.31	7.11	−2.74**	7.08	6.90	−2.54**	7.24	7.00	−3.31**	7.01	6.88	−1.85*
	5~10	7.42	7.29	−1.75*	7.15	7.05	−1.40*	7.35	7.16	−2.59**	7.08	7.06	−0.28
	10~20	7.63	7.36	−3.54**	7.19	7.17	−0.28	7.55	7.30	−3.31**	7.12	7.07	−0.70
	20~30	7.74	7.40	−4.39**	7.20	7.14	−0.83	7.66	7.26	−5.22**	7.13	7.15	0.28
	30~40	7.69	7.48	−2.73**	7.28	7.19	−1.24*	7.61	7.40	−2.76**	7.21	7.06	−2.08**
A3	0~5	7.45	7.21	−3.22**	7.17	7.02	−2.09**	7.38	7.12	−3.52**	7.10	7.04	−0.85
	5~10	7.55	7.32	−3.05**	7.18	7.09	−1.25*	7.43	7.26	−2.29*	7.11	7.05	−0.84
	10~20	7.75	7.37	−4.90**	7.15	7.19	0.56	7.52	7.30	−2.93**	7.08	7.12	0.56
	20~30	7.79	7.39	−5.13**	7.20	7.07	−1.81*	7.58	7.36	−2.90**	7.13	7.16	0.42
	30~40	7.80	7.60	−2.56**	7.23	6.91	−4.43**	7.58	7.44	−1.85*	7.16	7.08	−1.12*
A4	0~5	7.61	7.30	−4.07**	7.44	7.21	−3.09**	7.33	7.28	−0.68	7.37	7.14	−3.12**
	5~10	7.58	7.61	0.40	7.09	7.13	0.56	7.43	7.40	−0.40	7.02	7.27	3.56**
	10~20	7.73	7.68	−0.65	7.21	7.19	−0.28	7.47	7.50	0.40	7.14	7.16	0.28
	20~30	7.82	7.74	−1.02*	7.23	7.12	−1.52*	7.50	7.55	0.67	7.16	7.15	−0.14
	30~40	7.66	7.60	−0.78	7.18	7.15	−0.42	7.31	7.58	3.69**	7.11	7.18	0.98*
A5	0~5	7.71	7.80	1.17*	7.85	7.95	1.27*	7.63	7.70	0.92*	7.77	7.84	0.90*
	5~10	7.51	7.65	1.86*	7.30	7.80	6.85**	7.37	7.57	2.71**	7.23	7.73	6.92**
	10~20	7.66	7.72	0.78	7.37	7.62	3.39**	7.54	7.60	0.80	7.30	7.60	4.11**
	20~30	7.69	7.60	−1.17*	7.30	7.46	2.19*	7.50	7.55	0.67	7.23	7.57	4.70**
	30~40	7.88	7.66	−2.79**	7.22	7.36	1.94*	7.41	7.44	0.40	7.15	7.53	5.31**

注:*表示在0.05水平差异显著;**表示在0.01水平差异显著。

土壤pH,可以看出,酸溶液灌溉次数增加,土壤pH下降。相反,碱性溶液灌溉次数增加,土壤pH上升。A1、A2、A3和A4处理中个别土层的土壤pH有所上升,但增幅较小,基本都小于0.1。不同处理,不同土层,土壤pH的增(降)幅度不同,总的来说,0~20 cm土层土壤pH变化较大,20 cm以下土层土壤较小,对于个别酸度较低的溶液,20 cm以下土层土壤pH几乎没有变化。与A2、A3、A4和A5处理相比,当灌溉量增加时,A1处理下0~20 cm土层土壤pH的降幅要大于低灌溉量处理下的土壤pH,这主要是由于A1酸性太强,与表层土壤完全反应。

图3是盆栽试验期间第6次灌溉溶液后各处理下不同土层一周内的变化情况,总的来说,除了A5,所有处理的土壤pH在灌溉溶液当天最低,然后慢慢恢复,且在灌溉溶液当天,各土层间土壤pH差异最大。对于A5处理,由于溶液pH较高,滴入土壤后土壤pH呈现出一个先升后降的趋势。对比图3中的20种处理,可以看出,W2(图3b、3d)处理下各土层间土壤pH的差异要大于W1(图3a、3c),这主要是由于灌溉量较高时,溶液中的H^+较多,其携带到底层土壤的H^+也多,导致底层土壤pH相对较低,而低灌溉量处理下,溶液中的H^+较少,在溶液下渗过程中就已经反应的差不多了,导致进入底层土壤的H^+减少,土壤pH较高。同样,由于进入底层土壤的H^+多,使得W2处理下各土层的土壤一直在和H^+产生反应,土壤pH恢复较慢,所以图3b、3d中W2的曲线比较分散,而W1(图3a、3c)中的曲线比较集中。

2.3 不同处理对模拟试验土壤pH的影响

灌溉溶液pH不同,其对土壤pH的影响也不同,对模拟试验的最终结果进行方差分析(图4),各处理的土壤pH大小为S1<S2<S3<S5<S4<S6。S1的土壤pH最小,为7.70,与其他处理的土壤pH达到了极显著($P<0.01$)差异水平。S2、S3的土壤pH比S1分

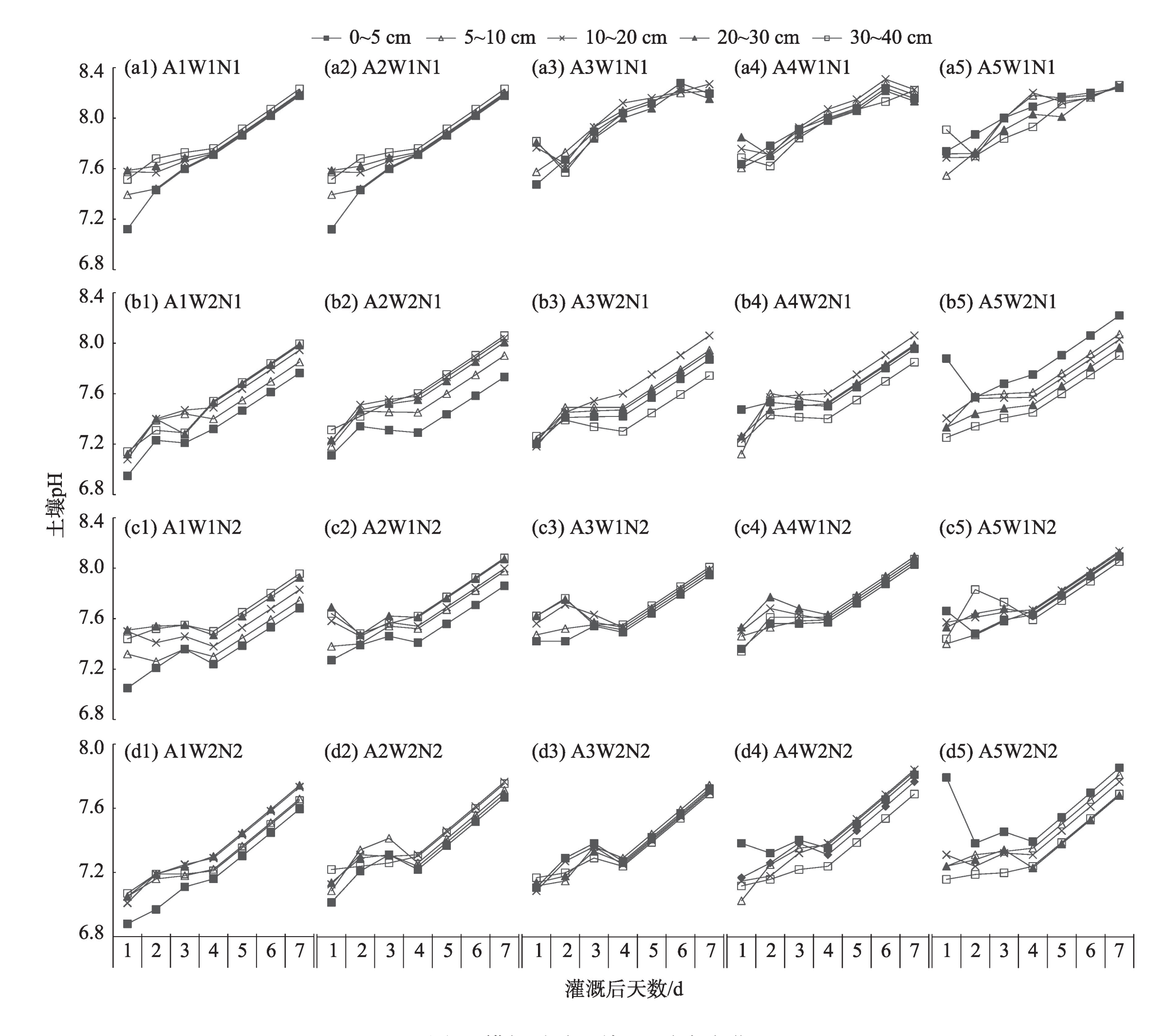
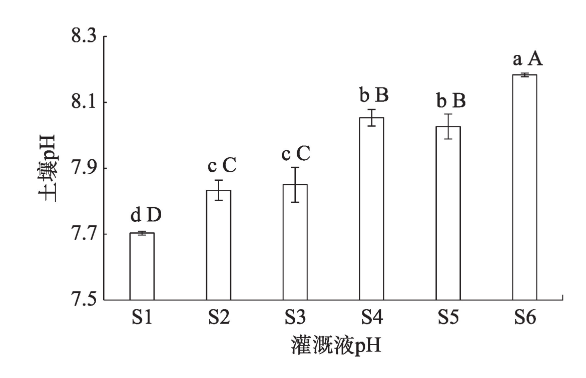


图3 模拟试验土壤pH动态变化

Fig. 3 Dynamic change of soil pH during the simulation experiment



注：小写字母表示在0.05水平显著；大写字母表示在0.01水平显著。

图4 不同灌溉液pH处理下的土壤pH

Fig. 4 Soil pH under different pH of solution

别增加了0.13、0.15个单位，差异极显著，但S2和S3之间无差异，说明溶液越酸，其对土壤pH的降低效果越显著。相比CK，S4的土壤pH略有增加，为0.02个单位，差异不明显。S6的土壤pH最大，比对照高了0.13个单位，而比S1要高出0.48个单位，S6与各处理间差异极显著。

2.4 不同处理对盆栽试验土壤pH的影响

2.4.1 同处理下不同土层土壤pH的变化 将特定水肥组合下不同土层的土壤pH进行整合求平均值（图5），可以看出，施氮量或灌水量的不同对0~40 cm土层土壤pH的变化趋势影响不大，各土层土壤pH的大小都是0 ~ 5 cm < 5 ~ 10 cm < 10 ~ 20 cm < 20 ~ 30 cm < 30 ~ 40 cm。在W1N1处理下，各土层土壤pH分别为7.86、7.93、7.98、8.05和8.11，当施氮量增加，除30 ~ 40 cm土层土壤pH增加了0.03外，其他各土层土壤pH分别下降0.07、0.08、0.04和0.02；增加灌水量，土壤pH也有所降低。W2N1处理下0~5 cm土层土壤pH为7.77，相比5 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm和30 ~ 40 cm土层土壤pH分别减少了0.1、0.18、0.27和0.37，而W2N2处理下各土层

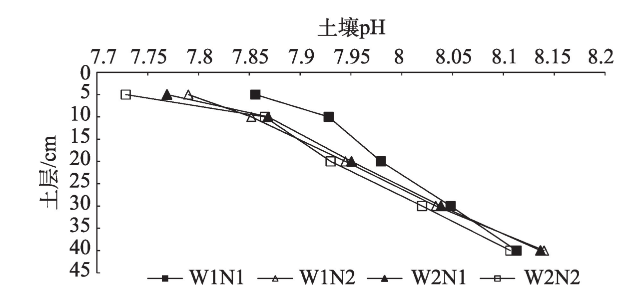


图5 灌水量和施氮量对不同土层土壤pH的影响

Fig. 5 Effects of different irrigation amount and nitrogen rate on soil pH in different soil layers

土壤pH最低，分别为7.73、7.87、7.93、8.02和8.11。对比W1N1、W1N2、W2N1和W2N2这几种水肥组合，0~5 cm与30~40 cm土层土壤pH的差值分别为0.26、0.35、0.37和0.38，可以发现，增加灌水量或施氮量都能增加各土层土壤pH的差值。方差分析结果表明，同一水肥组合下除W1N2处理的0~5 cm和5~10 cm土壤pH的差异达到显著（$P<0.05$）水平之外，其他各处理各土层土壤pH的差异都达到了极显著水平。

用相同的方法分析灌溉溶液pH对不同土层土壤pH的影响（图6），土壤pH随着土层深度的增加而增加。A1处理下0~40 cm土层土壤pH变化幅度最大，0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm土层土壤pH分别为7.27、7.67、7.84、7.98和8.08，各土层土壤pH之间的差异均达到了极显著水平，同时，在这一处理下，0~5 cm与30~40 cm土层土壤pH相差高达0.81。

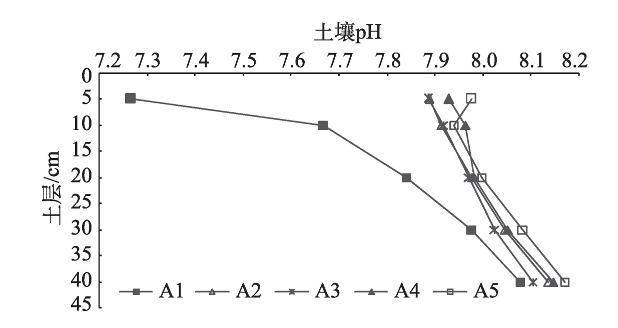


图6 溶液pH对不同土层土壤pH的影响

Fig. 6 Effects of fluid's pH on soil pH in different soil layers

与A1相比，A2、A3、A4、A5四个处理下土壤垂直方向pH差异相对较小。从上往下，A2处理各土层土壤pH分别为7.89、7.91、7.98、8.05和8.14，其中，0~5 cm与5~10 cm土层土壤pH之间差异显著，而与10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm三个土层土壤pH之间差异极显著，同时，其他各土层土壤pH之间也达到了极显著差异水平。与A2处理比较，A3处理各土层土壤pH之间的差异有所减小，0~5 cm土层土壤pH为7.89，除与5~10 cm土层土壤pH之间达到显著差异水平之外，与其他各土层土壤pH之间均达到了极显著差异水平。A4处理中各土层土壤pH又有所增加，其中，5~10 cm、10~20 cm土层土壤pH分别为7.96、7.98，差值较小，但两者之间的差异也达到了显著水平。A5处理下，各土层土壤pH最高，0~5 cm土层土壤pH为7.98，相比10~20 cm、

20~30 cm、30~40 cm土层,土壤pH分别减小了0.02、0.1、0.19,其中,5~10 cm与10~20 cm土层土壤pH之间无差异,与0~5 cm、20~30 cm、30~40 cm土层土壤pH间差异显著。

2.4.2 不同处理相同土层下土壤pH的变化 在相同的灌水量和施氮量处理下比较灌溉溶液pH对0~5 cm土层土壤pH的影响(图7),0~5 cm土层土壤的pH与灌溉溶液pH呈正相关关系。如图7a所示,W1N1处理下,0~5 cm土层土壤pH相对较高。此时,A1的土壤pH为7.40,相比A2、A3、A4和A5,分别降低了0.45、0.62、0.58、0.64,差异达到极显著水平。而A3、A4、A5这3个处理下的土壤pH相近,各处理间差异不显著,且A4处理下的土壤pH要略低于A3。

施氮量相同,只增加灌水量,各处理的0~5 cm土层土壤pH变化见图7b,同样,A1处理的土壤pH最低,为7.16,相比图7a中的A1处理,0~5 cm土层土壤pH降低了0.24,差异显著。A2、A3、A4、A5处理下的土壤pH分别为7.93、7.86、7.93、7.97,远高于A1,与A1的差异达到极显著水平,但这四个处理之间差异不显著。相比于A2W1N1,A2W2N1处理下的土壤pH要高出0.08,差异显著。

只增加施氮量时,与W1N1相比0~5 cm土层土壤pH变化如图7c,此处理下,A2的土壤pH最高,为7.97,略高于A5,与A4之间差异显著。A1的土壤pH为7.35,显著低于其他四个处理,同时,相比图7a中的A1处理,两者之间差异不显著,但显著高于图7b中的A1处理,说明增加施氮量对0~5 cm土层土壤pH的影响不大,但灌水量对0~5 cm土层土壤pH是有一定的影响的。A3的土壤pH为7.79,仅高于A1,与各处理均达到极显著差异。

高灌水量和高施氮量处理下(图7d),土壤pH的变化趋势为A1<A2<A3<A4<A5。A1的土壤pH为7.16,显著低于其他各处理。A4的土壤pH为7.91,略高于A3(0.03),又略低于A5(0.04),差异不显著。A2的土壤pH要比A1高出0.63,除与A3差异显著外,与其他处理的差异达极显著水平。

总体来说,pH为1.5的灌溉溶液对土壤pH的降低程度非常明显,pH为3.5的灌溉溶液也能显著降低土壤pH,但对于pH为5.5、7.5和9.5的灌溉溶液,对土壤pH的降低效果不明显。

灌水量与施氮量相同,灌溉溶液pH不同的处理下,5~10 cm土层土壤pH随灌溉溶液pH的增加而增加(图8)。A1对5~10 cm土层土壤pH的降幅

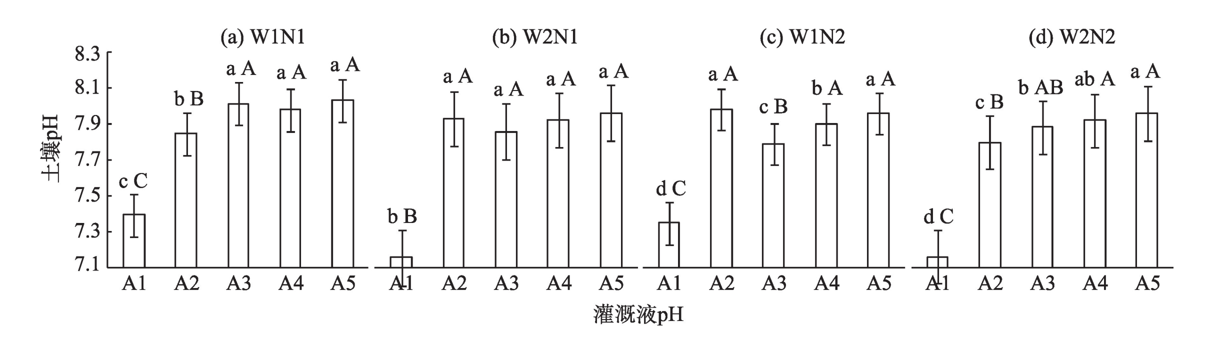


图7 不同处理对0~5 cm土层土壤pH的影响

Fig. 7 Effects of treatments on soil pH in 0–5 cm soil layer

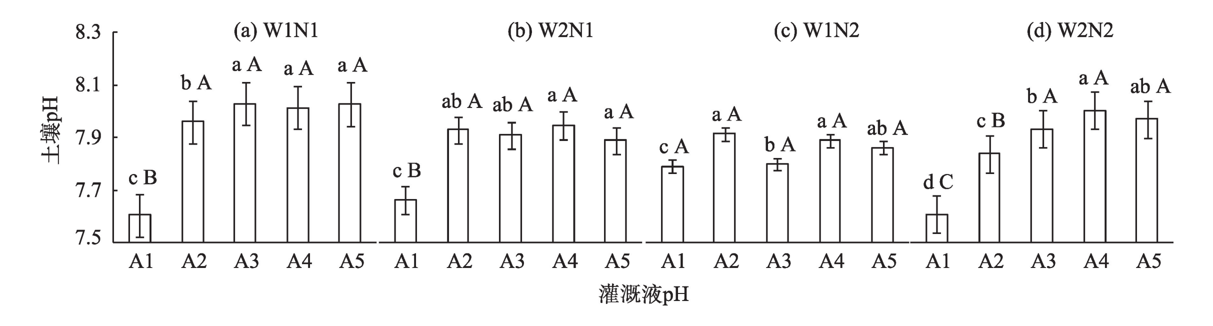


图8 不同处理对5~10 cm土层土壤pH的影响

Fig. 8 Effects of treatments on soil pH in 5–10 cm soil layer

最大，W1N1、W2N1、W1N2和W2N2处理中A1的土壤pH分别为7.61、7.67、7.79和7.61，与其他灌溉溶液pH之间达到显著（W1N2）或极显著（W1N1、W2N1、W2N2）差异。而A2与A3、A4、A5之间的差异并不是很大，在W1N1处理下，A2的土壤pH为7.96，比A3、A4、A5分别低了0.07、0.06和0.07，差异显著。在W2N1和W1N2处理下，A2、A3、A4、A5之间的差异并不是很显著，但在W2N2处理下，A2的土壤pH为7.84，相比A3、A4、A5，降幅达0.09~0.16，差异极显著。同时，与W1N1处理下的A2相比，W2N2处理下A2的5~10 cm土层土壤pH降低了0.12，差异极显著。A3、A4和A5这3种灌溉溶液，同一水肥处理下各处理的土壤pH之间差异不大，但相比W1N1，增加灌水量或施氮量，A3、A4、A5的土壤pH又有所降低，尤其是W1N2处理的A3，其土壤pH为7.80，与其他各处理间达到显著或极显著差异。与0~5 cm土层土壤pH相比，A3、A4和A5土壤pH之间差异的减小说明灌溉溶液pH对5~10 cm土层土壤pH的影响已经开始降低了。

图9为灌水量与施氮量相同、灌溉溶液pH不同时10~20 cm土层土壤pH的方差分析结果，可以看出，除W1N2外，对于其他三种水肥组合，就A1对此层土壤pH有一定的降低作用。其中，W1N2处理下A1的土壤pH为7.99，较W1N1、W2N1和W2N2处理下A1的土壤pH分别增加了0.23、0.16和0.20，差异显著，但W1N1、W2N1和W2N2处理下A1的土壤pH之间无差异。A1的土壤pH与A2、A3、A4、A5之间极显著差异（图9a、9b和9d），但在图9c中，A1的土壤pH仅与A3的差异显著，且比A3高0.12。此外，各水肥组合下A2、A3、A4、A5的土壤pH基本都在8.00左右，说明溶液pH对此层土壤pH的影响进一步降低了。

相同灌水量和施氮量，不同灌溉溶液pH处理下，20~30 cm土层（图10）和30~40 cm土层（图11）土壤pH的方差分析结果表明，除个别处理，其他处理下的土壤pH无差异或差异不大，且对于同一水肥组合，A1、A2、A3、A4和A5的土壤pH在两个土层中的变化趋势基本一致，说明灌溉溶液pH对20 cm以下土层土壤pH的影响很微弱。

2.4.3 H_2SO_4用量对土壤pH的影响 由上文结果分析可知，加入H_2SO_4对0~20 cm土层土壤pH影响较大，20 cm以下，土壤pH几乎没什么变化，在此基础

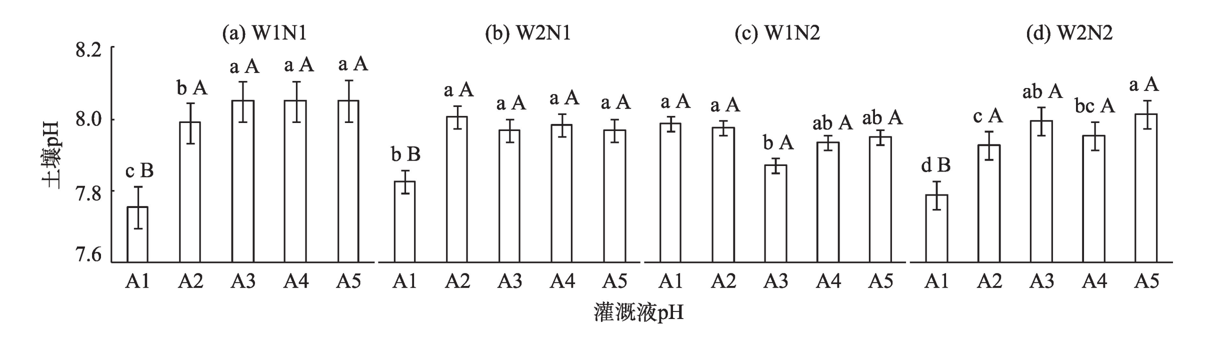


图9 不同处理对10~20 cm土层土壤pH的影响

Fig. 9 Effects of treatments on soil pH in 10−20 cm soil layer

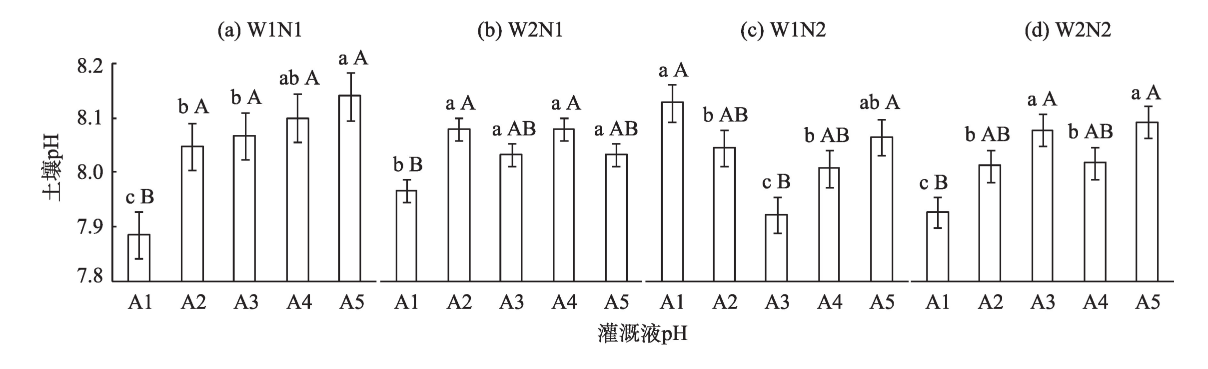


图10 不同处理对20~30 cm土层土壤pH的影响

Fig. 10 Effects of treatments on soil pH in 20−30 cm soil layer

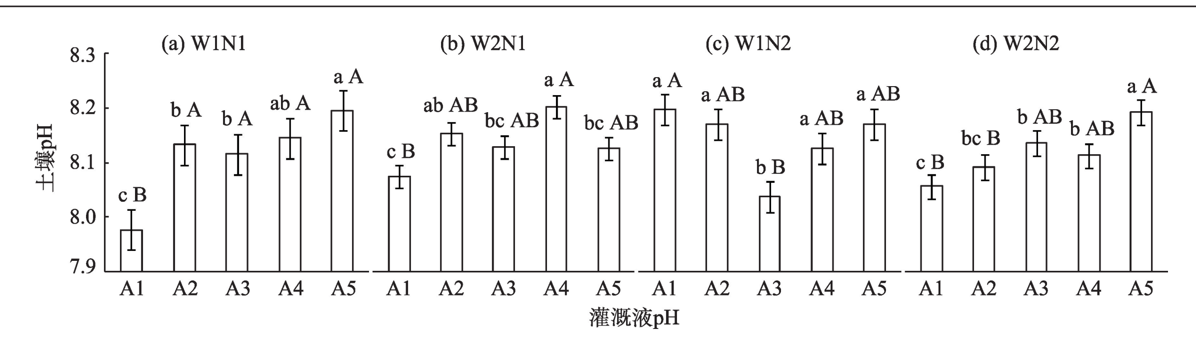


图11　不同处理对30~40 cm土层土壤pH的影响

Fig. 11　Effects of treatments on soil pH in 30−40 cm soil layer

上,对整个试验期间不同用酸量下的土壤pH进行整合平均,得到表3,其98%H_2SO_4用量(x)与土壤pH(y)之间的关系为:

$$y=5\times10^{-8}x^2-0.0003x+7.9253(R^2=0.9952)$$

可见,当施入土壤的H_2SO_4达到一定量的时候,可以有效地降低碱土pH。需要注意的是,表中是耕层土壤的平均pH,在实际操作中各土层的土壤pH会有波动,可参考前文的内容进行判断。

表3　H_2SO_4用量对0~20 cm土层土壤pH的影响

Tab. 3　Effects of H_2SO_4' s dosage on soil pH in 0−20 cm soil layers

98%H_2SO_4用量/(L·hm^{-2})	0.13	0.26	12.90	25.78	1288.97	2577.94
土壤pH	7.93	7.92	7.94	7.90	7.65	7.54

3　讨 论

土壤pH的改变是一个十分缓慢的过程,近年来,很多学者围绕如何降低碱性土壤pH开展了大量的工作,也促进了一些新技术、新型肥料[2,11−12]的出现,比如,王晓刚等[13]发现液体肥料对土壤pH有明显的改良作用。本试验是以水肥一体化技术为支撑进行研究的,在模拟试验中,土壤pH随着灌溉溶液的加入上下波动,相比对照,酸性溶液对土壤pH的降低程度显著,pH为1的灌溉溶液处理下的土壤pH相比对照降低了0.35,显著低于其他各处理,可见,酸性物质对灌漠土pH的影响是非常大的,这与前人的研究一致[1,3,14]。张皓禹等[15]在滴灌条件下研究了几种酸化剂或酸性肥料对石灰性土壤的改良效果,发现这几种物质都能降低土壤pH,并提高养分的有效性,且土层越深,各处理下的土壤pH越高。本试验也有类似结果,但对于灌溉溶液pH为9.5的处理,0~5 cm土层土壤pH要略高于5~10 cm土层,主要由于碱性溶液对表层土壤的作用比较强,导致土壤pH的降幅较小。同时,pH为1.5的灌溉溶液对表层土壤pH降低程度非常明显,与原土相比,降幅超过1,相比当地灌溉水pH的平均水平,其他两个酸性灌溉溶液也能显著降低土壤pH。

一般来说,土壤中酸性物质的施入量越大,土壤pH降低幅度越大[16]。刘佳等[12]研究发现,化肥的长期施用会严重加剧旱地红壤的酸化程度。吴曦等[17]通过盆栽试验发现碱土pH随硫磺使用量的增加而呈降低趋势,但硫水平过高会对油菜的生长不利。在盆栽试验中,高灌溉量处理下,pH为1.5的灌溉溶液处理下0~5 cm土层土壤pH为7.16,而低灌溉量处理下为7.35~7.4,两者差异显著,可见,土壤pH与灌水量,也就是进入土壤中的H^+的量呈显著正相关。常青等[18]通过研究不同稀释倍数的木醋液也得到了类似结果。对比模拟试验与盆栽试验的土壤pH,可以发现,尽管模拟试验和盆栽试验所设的灌溉溶液pH差异不大,但在盆栽试验耕层,尤其是0~5 cm土层土壤pH比模拟试验的土壤pH要低很多,这主要是由于在盆栽试验中,大量的灌溉溶液首先与表层土壤反应,导致表层土壤pH产生了非常大的变化。

近年来,由于大量地使用氮肥,加快了土壤酸化的进程[19],尿素进入土壤后,虽短时间内能提高土壤pH[20−22],但最终还是会使土壤慢慢酸化。不过在本试验中,增加灌水量或施氮量仅能使土壤的平均pH降低0.03,差异并不显著,这主要是由于尿素对土壤pH的降低是一个长期累积的过程,而本试验持续时间短,施氮量并不足以引起土壤pH的显著变化。

4 结 论

酸性溶液能显著降低灌漠土土壤pH,灌溉溶液进入土壤后,土壤pH先是下降,然后慢慢恢复,且随着灌溉次数的增加,土壤pH越来越低。pH为1.5的灌溉液可使0~5 cm土层土壤pH降至7.16~7.4,与各处理间差异显著。各处理下土壤pH随土层深度的增加而增加,当灌溉溶液pH为1.5时,各土层间土壤pH差异最大。增加灌水量或施氮量对土壤pH影响不显著。不论灌溉溶液pH,还是灌水量或施氮量,主要是改变了耕层土壤的pH,对底层土壤pH影响不大。

参考文献(References):

[1] 李燕婷, 白灯莎·买买提艾力, 张福锁, 等. 酸性根际肥对石灰性土壤pH和铁有效性的影响研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 312−316. [Li Yanting, Baiengsha Maimaitiaili, Zhang Fusuo, et al. Effect of acidic rhizosphere fertilizer on the soil pH and Fe availability of calcareous soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(3): 312−316.]

[2] 张莉, 王婧, 逄焕成. 碱胁迫下磷酸脲降低土壤pH值促进菠菜生长[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 148−154. [Zhang Li, Wang Jing, Pang Huancheng. Decreasing soil pH value to promote spinach growth by application of urea phosphate under alkaline stress [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(2): 148−154.]

[3] 田吉林, 尉庆丰, 韦成才, 等. 酸化水和微肥在烤烟上的效果研究[J]. 西北农业大学学报, 1997, 25(5): 103−106. [Tian Jilin, Wei Qingfeng, Wei Chengcai, et al. Effects of acid water and trace element fertilizer on Fluecured Tobacco[J]. The Journal of Northwest Agricultural University, 1997, 25(5): 103−106.]

[4] 郭军玲, 金辉, 郭彩霞, 等. 不同有机物料对苏打盐化土有机碳和活性碳组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 26(8): 1290−1299. [Guo Junling, Jin Hui, Guo Caixia, et al. Effects of organic materials on soil organic carbon and fractions of active carbon in soda saline soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 26(8): 1290−1299.]

[5] 唐继伟, 李娟, 车升国, 等. 长期单施不同量化肥和有机肥后盐化潮土pH和EC的变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(8): 1300−1307. [Tang Jiwei, Li Juan, Che Shengguo, et al. Changes in pH and EC of salinized fluvo−aquic soil after long−term application of chemical or organic fertilizers[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(8): 1300−1307.]

[6] Butterly C, Baldock J, Tang C X, et al. Chemical Mechanisms of Soil pH Change by Agricultural Residues[C]//The 19th World Congress of Soil Science. Australia, Brisbane, 2010: 43−46.

[7] 王宁, 徐仁扣, 李九玉. 添加植物物料对2种酸性土壤可溶性铝的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(3): 59−62. [Wang Ning, Xu Renkou, Li Jiuyu. Effect of corporation of pant materials on the soluble Al in two types od acid soils[J]. Journal of Ecologyand Rural Environment, 2009, 25(3): 59−62.]

[8] 袁金华, 徐仁扣. 稻壳制备的生物质炭对红壤和黄棕壤酸度的改良效果[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(5): 472−476. [Yuan Jinhua, Xu Renkou. Effects of rice−hull−based biochar regulating acidity of red soil and yellow brown soil[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26(5): 472−476.]

[9] 樊小林, 李进. 碱性肥料调节香蕉园土壤酸度及防控香蕉枯萎病的效果[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 938−946. [Fan Xiaolin, Li Jin. Effectiveness of alkaline fertilizer on banana Fusarium wilt control and the soil acidity regulation in degraded orchards[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2014, 20(4): 938−946.]

[10] 陈震, 车宗贤. 肥料酸化对灌漠土氨挥发的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(12): 102−109. [Chen Zhen, Che Zongxian. Effects of fertilizer acidification on ammonia volatilization from irrigated desert soil[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(12): 102−109.]

[11] 李霞, 杨定清, 李旭毅, 等. 秸秆还田下配施石灰、尿素和腐熟剂对水稻Cd吸收累积的影响研究[J]. 中国农学通报, 2019, 35 (7): 1−6. [Li Xia, Yang Dingqing, Li Xuyi, et al. Returning straw combined with Lime, urea and straw−decomposing inoculant: Effects on Cd accumulation in rice[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35 (7): 1−6.]

[12] 刘佳, 陈晓芬, 刘明, 等. 长期施肥对旱地红壤细菌群落的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 468−478. [Liu Jia, Chen Xiaofen, Liu Ming, et al. Effects of long−term fertilization on bacterial community in upland red soil[J]. Acta Pedologica Sinic, 2020, 57(2): 468−478]

[13] 王晓刚, 叶海辉, 邓爱妮, 等. 液体改良肥对土壤pH值和苦瓜产量的影响[J]. 现代农业科技, 2019(6): 31−33. [Wang Xiaogang, Ye Haihui, Deng Aini, et al. Effects of liquid modified fertilizer on soil pH and yield of balsam pear[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019(6): 31−33.]

[14] 杨彬林, 谢香文, 王振华, 等. 四种有机废弃物对新疆盐碱地及甜菜苗期生长的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, 56(1): 122−127. [Yang Binlin, Xie Xiangwen, Wang Zhenhua, et al. Effects of four organic wastes on saline−alkali soil in Xinjiang and the growth of sugar beet in seeding stage[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2019, 56(1): 122−127.]

[15] 张皓禹, 黄志华, 王娟, 等. 不同酸化剂对石灰性土壤pH值、磷有效性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, 56(1): 145−150. [Zhang Haoyu, Huang Zhihua, Wang Juan, et al. Effects of different acidifiers on pH and phosphorus availability in calcareous soil [J]. Chinese Journal of Soil and Fertilizer, 2019, 56(1): 145−150.]

[16] 宋晓培, 宋文静, 芦伟龙, 等. 不同硫酸钾用量对植烟土壤细菌群落的影响[J]. 中国烟草科学, 2019, 40(1): 33−40. [Song Xiao-

pei, Song Wenjing, Lu Weilong, et al. Effects of different potassium sulfate levels on bacterial community of tobacco planting soil [J]. Chinese Tobacco Science, 2019, 40(1): 33–40.]

[17] 吴曦, 陈明昌, 杨治平. 碱性土壤施硫磺对油菜生长、土壤pH和有效磷含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 671–677. [Wu Xi, Chen Mingchang, Yang Zhiping. Effects of sulfur applicat ion on the growth of rape, soil pH and available P in alkaline soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(4): 671–677.]

[18] 常青, 王永亮, 杨治平, 等. 木醋液对土壤pH、EC与茄子叶片光合特性及根系发育的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(3): 322–328. [Chang Qing, Wang Yongliang, Yang Zhiping, et al. Effects of wood vinegar on soil pH, EC, and the photosynthetic characteristics of eggplant leaves and root development[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36(3): 322–328.]

[19] 徐仁扣. 土壤酸化及其调控研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(2): 238–244. [Xu Renkou. Research progresses in soil acidification and its control[J]. Soils, 2015, 47(2): 238–244.]

[20] Ferguson R B , Kissel D E , Koelliker J K , et al. Ammonia volatilization from surface-applied urea: Effect of hydrogen ion buffering capacity1[J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, 48(3): 578.

[21] Kissel D E, Cabrera M L, Ferguson R B. Reactions of ammonia and urea hydrolysis products with soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, 52(6): 1793–1796.

[22] Sait Gezgin, Fethi Bayrakll. Ammonia volatilization from ammonium sulphate, ammonium nitrate, and urea surface applied to winter wheat on a calcareous soil[J]. Journal of Plant Nutrition, 1995, 18(11): 2483–2494.

Effects of fertilizer acidification on the soil pH of irrigated desert soil

CHEN Zhen[1,2], CHE Zong-xian[1,2], ZHANG Jiu-dong[1], CUI Yun-ling[1], ZHANG Li-qin[1]

(1. *Institute of Soil, Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou* 730070, *Gansu, China*; 2. *College of Resourse and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou* 730070, *Gansu, China*)

Abstract: The effect of different acidity of water and fertilizer solutions on the pH of irrigated desert soil were studied. Five irrigation set-ups were made with different pH: A1 (1.5), A2 (3.5), A3 (5.5), A4 (7.5), (CK), and A5 (9.5); two irrigation quantity: W1 (1500 $m^3 \cdot hm^{-2}$) and W2 (3000 $m^3 \cdot hm^{-2}$); and two applied amount of N fertilizer: N1 (450 $kg \cdot hm^{-2}$) and N2 (900 $kg \cdot hm^{-2}$), leading to a total of 20 treatments. Related studies through pot experiment were done. This study showed that (1) the soil pH was significantly positively correlated with the irrigation solution pH. The soil pH of 0–5 cm soil layer under A1 treatment can be reduced to 7.16–7.4, which was 0.45–0.81 units lower than A1, A2, A3, and A4. (2) Increasing the amount of irrigation or nitrogen have no significant effect on soil pH. (3) The soil pH was the lowest on the day of the application of irrigation solution, and then slowly recovered. As the number of irrigations increased, the soil pH became lower and lower. (4) Under each treatment, the soil pH increased with the increase in soil layer depth. Among them, the soil pH of 0–5 cm, 5–10 cm, 10–20 cm, 20–30 cm, and 30–40 cm soil layers under A1 treatment were 7.27, 7.67, 7.84, 7.98, and 8.08, respectively. The difference of soil pH between the soil layers is the largest. The acidic solution can significantly reduce the pH of the irrigated desert soil. Regardless of the pH of the solution and the amount of irrigation or nitrogen applied, the pH of the cultivated soil layer was mainly changed, and the pH of the bottom soil was not greatly affected. Thus, we can adjust the acidity of the solution to make the pH of the alkaline soil lower in agricultural production. This will provide a scientific basis for the efficient management of nutrient resources of alkaline soil. It will guarantee the healthy growth of crops.

Keywords: acidic fertilizer; soil pH; irrigated desert soil; *Lolium perenne*; integration of water and fertilizer